

Hur kan Östersjöns salinitet påverkas av ett förändrat klimat?

How can the salinity of the Baltic Sea change due to climate change?

Jonathan Lindén

Kandidat
Biologi och miljövetenskap

Institutionen för Energi och Teknik
Department of Energy and Technology

Examensarbete 2019:06
ISSN 1654-9392
Uppsala 2019

SLU, Sveriges Lantbruksuniversitet
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Titel på svenska: Hur kan Östersjöns salinitet påverkas av ett förändrat klimat?
Titel på engelska: How can the salinity of the Baltic Sea change due to climate change?

Författare: Jonathan Lindén

Handledare: Hans Liljenström, Institutionen för Energi och Teknik, SLU
Examinator: Tomas Thierfelder, Institutionen för Energi och Teknik, SLU

Kurs: Självständigt arbete i Miljövetenskap
Kurskod: EX0896
Omfattning: 15
Nivå: G2E
Program: Biologi och miljövetenskap

Serienamn: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU), 2019:06
ISSN: 1654-9392

Uppsala 2019

Nyckelord: Östersjön, salinitet, salthalt, klimatförändringar

Online publication: <http://stud.epsilon.slu.se>

Sammanfattning

Östersjön är ett av världens största bräckta hav, med en karaktäristisk salinitetsgradient som löper genom hela havet. Detta beror på Östersjöns höga tillskott av sötvatten från avrinning i jämförelse med dess avdunstning, vilket leder till ett överskott av sötvatten som flödar från Östersjön till Nordsjön genom Bälthavet och Öresund.

Studier tyder på en framtida accelererad hydrologisk cykel på grund av klimatförändringar vilket skulle leda till en förstärkning av skillnaden mellan söta och salta hav i världen. I denna studie har Östersjöns hydrologiska cykel modellerats för att undersöka hur salinitet i dess ytvatten kan påverkas av klimatförändringar. Detta har gjorts för tre av de klimatscenarier som antogs av IPCC år 2014, RCP2.6, RCP4.5 samt RCP8.5. Resultatet tyder på en minskning av saliniteten i hela Östersjön i alla klimatscenarier, dock en något svagare minskning än i liknande studier. Resultatet är osäkert då många förenklingar och antaganden varit nödvändiga för att begränsa studiens omfattning.

Nyckelord: Östersjön, salinitet, salthalt, klimatförändringar

Abstract

The Baltic Sea is one of the largest brackish seas in the world, with a characteristic salinity gradient from its northernmost point southward towards the Danish Straits. This gradient is caused by a high freshwater input from its surrounding catchment areas. With a low evaporation rate, this leads to an abundance of freshwater which is forced to flow from the Baltic Sea to the North Sea through the Danish Straits.

Studies indicate a future accelerated hydrological cycle caused by climate change, which would lead to an increased difference between fresher and more saline oceans. In this study, the hydrological cycle of the Baltic Sea has been modelled to investigate a potential change in salinity as an effect of climate change. This has been done for three of the climate scenarios adopted by the IPCC in 2014, RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. The results indicate a decreased salinity in the entire Baltic Sea, in all climate scenarios. Similar studies show an even greater decrease in salinity. The results are uncertain because of the many simplifications and assumptions that have been necessary to limit the scope of this study.

Keywords: Baltic Sea, salinity, climate change

Innehållsförteckning

Tabellförteckning	6
Figurförteckning	7
Förkortningar	9
1 Inledning	11
1.1 Bakgrund	11
1.1.1 Salinitet och strömmar	11
1.1.2 Klimatförändringar	12
1.2 Syfte	13
2 Metod	14
2.1 Systemgränser	14
2.2 Data	15
2.2.1 Salinitet	15
2.2.2 Nederbörd och avdunstning	17
2.2.3 Avrinning	17
2.2.4 Bassånger	17
2.2.5 Klimatscenarier	18
2.3 Modell	19
2.3.1 Vatten	20
2.3.2 Salt	21
2.3.3 Simuleringar	22
3 Resultat	23
3.1 Känslighetsanalys	25
4 Diskussion	27
4.1 Validering	27

4.2	Osäkerheter	28
4.3	Alternativa modellkonstruktioner	30
4.4	Modelleringsverktyg	31
5	Slutsats	33
	Referenslista	34
	Tack	37
	Bilaga 1 - Resultat	38
	Bilaga 2 - Känslighetsanalys	39

Tabellförteckning

Tabell 1. Nederbörd, avdunstning, avrinning från land samt nettoflöde per ytenhet i samtliga bassänger, värden visas i $10^{-3} \text{ km}^3/\text{år km}^2$.	17
Tabell 2. Minskad salinitet i Östersjöns bassänger för perioden 2070–2099 jämfört med 1961–1990.	38
Tabell 3. Sänkning av saliniteten i Östersjöns bassänger vid minskad tillförsel av salt från vertikal transport och tillflöden i riktning mot nettoströmmar.	39
Tabell 4. Sänkning av saliniteten i Östersjöns bassänger vid ökad tillförsel av salt från vertikal transport och tillflöden i riktning mot nettoströmmar. Observera att negativa värden innebär högre salinitet.	39

Figurförteckning

- Figur 1.* Uppdelning av bassänger i Östersjön samt dess avrinningsområde.
Bassänger © HELCOM (2019); Avrinningsområde: CCM River and Catchment Database © European Com-mission - JRC, 2007 (Vogt *et al.* 2007). 15
- Figur 2.* Salinitet i Östersjöns bassänger för perioden 1960–1990. Årsvariationer förekommer, men över tid är saliniteten jämn. 16
- Figur 3.* Utvalda avrinningsområden representativa för klimatscenarier för Östersjöns bassänger. Modelldata för avrinningsområden representerar bassängerna enligt följande: 1 (Luleälven, Ålån och Rosån): Bottenviken; 2 (Gådeån och Indalsälven): Bottenhavet; 3 (Motala ström): Egentliga Östersjön, Finska viken och Rigabukten; 4 (Nybroån, Sege å, Höje å, Kävlingeån, Saxån och Råån): Bälthavet. Bassänger © HELCOM (2019); Specifika avrinningsområden © HELCOM (2017); Avrinningsområde: CCM River and Catchment Database © European Commission - JRC, 2007 (Vogt *et al.* 2007). 19
- Figur 4.* Förenklad modell av vattenflödet i Östersjön. 21
- Figur 5.* Förenklad modell av saltflödet i Östersjön. Flödet "Transport in" omfattar vertikal transport och saltflöden i riktning mot nettoflödet. 21
- Figur 6.* Förändrad salinitet i Östersjöns bassänger för perioden 2070–2099 jämfört med 1961–1990. 23
- Figur 7.* Förändring av saliniteten i Östersjöns bassänger i utsläppsscenarierna RCP2.6, RCP4.5 samt RCP8.5 från år 1961 till 2099. Observera att skalan för Bälthavet skiljer sig från övriga bassänger. 24
- Figur 8.* Förändring av saliniteten i Östersjöns bassänger vid minskad tillförsel av salt från vertikal transport och tillflöden i riktning mot nettoströmmar. 25
- Figur 9.* Förändring av saliniteten i Östersjöns bassänger vid ökad tillförsel av salt från vertikal transport och tillflöden i riktning mot nettoströmmar. 26
- Figur 10.* Mängd provdata för saliniteten i Östersjön år 1961 till 1990. Rödare områden har mer provdata för perioden. Bassänger © HELCOM (2019);

Avrinningsområde: CCM River and Catchment Database © European
Com-mission - JRC, 2007 (Vogt *et al.* 2007); Salinitetsprover © ICES
(2019).

29

Förkortningar

HadCM3	Hadley Centre coupled model
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
psu	Practical Salinity Unit (g/kg)
RCAO	Rosby Centre Atmospheric-Ocean model
RCP	Representative Concentration Pathways

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Östersjön är med en area på över 400 000 km² (HELCOM 1986) och salinitet på mellan 3 och 16 psu (Practical Salinity Unit, g/kg) (ICES 2019) ett av världens största bräckta inlandshav. Dess geografiska utformning med tillförsel av sötvatten från ett avrinningsområde mycket större än havets yta (Bergström & Carlsson 1993), ger unika förhållanden med större tillskott än avdunstning av sötvatten. Överskottet av vatten flödar mot de trånga passagera i Öresund och Bälthavet, och transporterar då havssalt i samma riktning. Detta ger havet en salinitetsgradient med sött vatten i Bottenviken och saltare vatten vid Öresund och Bälthavet.

1.1.1 Salinitet och strömmar

Saltvatten har högre densitet än sötvatten, vilket innebär att vatten som strömmar in i Östersjön från Nordsjön genom Kattegatt sjunker under det söta ytvattnet. Detta bildar en haloklin, ett skikt inom vilket saliniteten snabbt ökar med djupet. Haloklinen hindrar omblandning av vattnet då den blir en barriär med saltare och därmed tyngre vatten djupare ned. Vertikal transport, alltså omblandning av ytvatten och djupvatten med olika salinitet, sker därför främst under specifika förhållanden, såsom under vissa årstider eller på grund av kustnära vindar (Krauss 2001).

I Östersjön existerar inga större permanenta strömmar. De strömmar som finns beror istället på andra faktorer, såsom vindar, avrinning och isbildning och är därför mer variabla. Avrinning från land får en strömriktning

påverkad av corioliskraften, vilket innebär att ytvattnet utmed finska västkusten generellt flödar norrut, och ytvattnet utmed svenska östkusten flödar söderut (Lindkvist & Hammarklint 2011).

Mängden salt i Östersjön skulle varje år minska med 4 % på grund av utflödet till Kattegatt om det inte vore för tillfälliga inflöden genom Bälthavet som kan öka saltinnehållet med 1-5 % (Reissmann *et al.* 2009). Dessa inflöden verkar inte styras av tillfälligt låga utflöden från vattendrag till Östersjön till skillnad från vad man kan anta, möjligtvis finns istället en svag negativ korrelation. Inflöden till Östersjön beror mer på förhållanden i Kattegatt och Nordsjön än i Östersjön, såsom vindar och tillfälliga höjningar av havsnivå samt horisontella skillnader i vattnets densitet (Winsor *et al.* 2001).

Studier gjorda kring hur saliniteten i de stora världshaven kan förändras i framtiden tyder på att salta hav kommer bli saltare, och söta hav sötare. Detta som ett resultat av en accelererad hydrologisk cykel (Helm *et al.* 2010). Söta hav ligger ofta i områden med en hög nederbörds mängd, och får därför en stor tillförsel av sötvatten, medan salta hav istället har mer torrt och varmt klimat och därmed mer avdunstning än vattentillskott. En acceleration av den hydrologiska cykeln kan komma att förstärka dessa förhållanden.

En förändring av Östersjöns salinitet kan ha stor påverkan på vattenlevande organismer. Många arter kräver en lägsta salinitet på ca 5 psu för framgångsrik reproduktion (Vuorinen *et al.* 2015), något som inte uppnås i Östersjöns norra delar.

1.1.2 Klimatförändringar

I IPCC:s femte syntesrapport, AR5, har man använt sig av fyra utsläppsscenarier med olika mängd solinstrålning (strålningsdrivning), så kallade RCP-scenarier (Representative Concentration Pathways). I denna studie används RCP2.6, RCP4.5 samt RCP8.5, där siffrorna representerar respektive scenarios strålningsdrivning i W/m^2 (IPCC 2007; Moss *et al.* 2010).

RCP2.6 innebär en stark minskning av växthusgasutsläpp och en temperaturökning, jämfört med förindustriell tid, som troligtvis inte överstiger 2°C. Strålningsdrivningen och därmed också temperaturökningen beräknas stanna av till år 2100 till skillnad från övriga scenarier. RCP2.6 är det enda scenario i vilket negativa växthusgasutsläpp förväntas till år 2100 (IPCC

2007). RCP2.6 är det scenario som ligger närmast vad som kan uppnås genom målen som sattes upp i Parisavtalet 2015 (Sanderson *et al.* 2016).

RCP4.5 representerar ett scenario med en minskning av utsläpp av växthusgaser jämfört med idag, men inte en lika stor förändring som i RCP2.6. Det är mer troligt att temperaturen kommer öka till över än under 2°C till år 2100, och fortsätta öka men sakta stabiliseras (IPCC 2007).

RCP8.5 är det av IPCC:s scenarier med högst strålningsdrivning och temperaturökning. Scenariot innebär fortsatta utsläpp av växthusgaser utan några större begränsningar jämfört med idag. Detta kan leda till en strålningsdrivning på minst 8.5 W/m² till år 2100, och en temperatur som sannolikt överstiger 4°C till år 2100 och sedan fortsätter öka (IPCC 2007).

1.2 Syfte

Målet med denna studie är att simulera hur saliniteten i Östersjöns ytvatten kan förändras till perioden 2070–2099 jämfört med 1961–1990, vid tre olika utsläppsscenarier.

För att genomföra detta skapas en modell i Insight Maker, med hjälp av data över hur vatten och salt rör sig till och från Östersjöns bassänger.

2 Metod

2.1 Systemgränser

Havet är ett mycket komplext system med en stor mängd faktorer som påverkar hur vatten och salt transporteras. Studien undersöker saliniteten i Östersjöns ytvatten till ett djup på 10 meter. Grundare partier än 10 meter tas inte med i studien, istället antas hela havet ha ett djup på minst 10 meter.

Östersjön definieras i denna studie i enlighet med HELCOMs avgränsning med 6 bassänger: Bottenviken, Bottenhavet, Finska viken, Rigabukten, Egentliga Östersjön samt Bälthavet (inklusive Öresund), se Figur 1. Kattegatt är ej inkluderat.



Figur 1. Uppdelning av bassänger i Östersjön samt dess avrinningsområde. Bassänger © HELCOM (2019); Avrinningsområde: CCM River and Catchment Database © European Com-mission - JRC, 2007 (Vogt *et al.* 2007).

Faktorer som påverkar saliniteten är nederbörd, avrinning från land, avdunstning, vertikal transport, samt strömmar mellan bassänger och mellan Östersjön och Kattegatt.

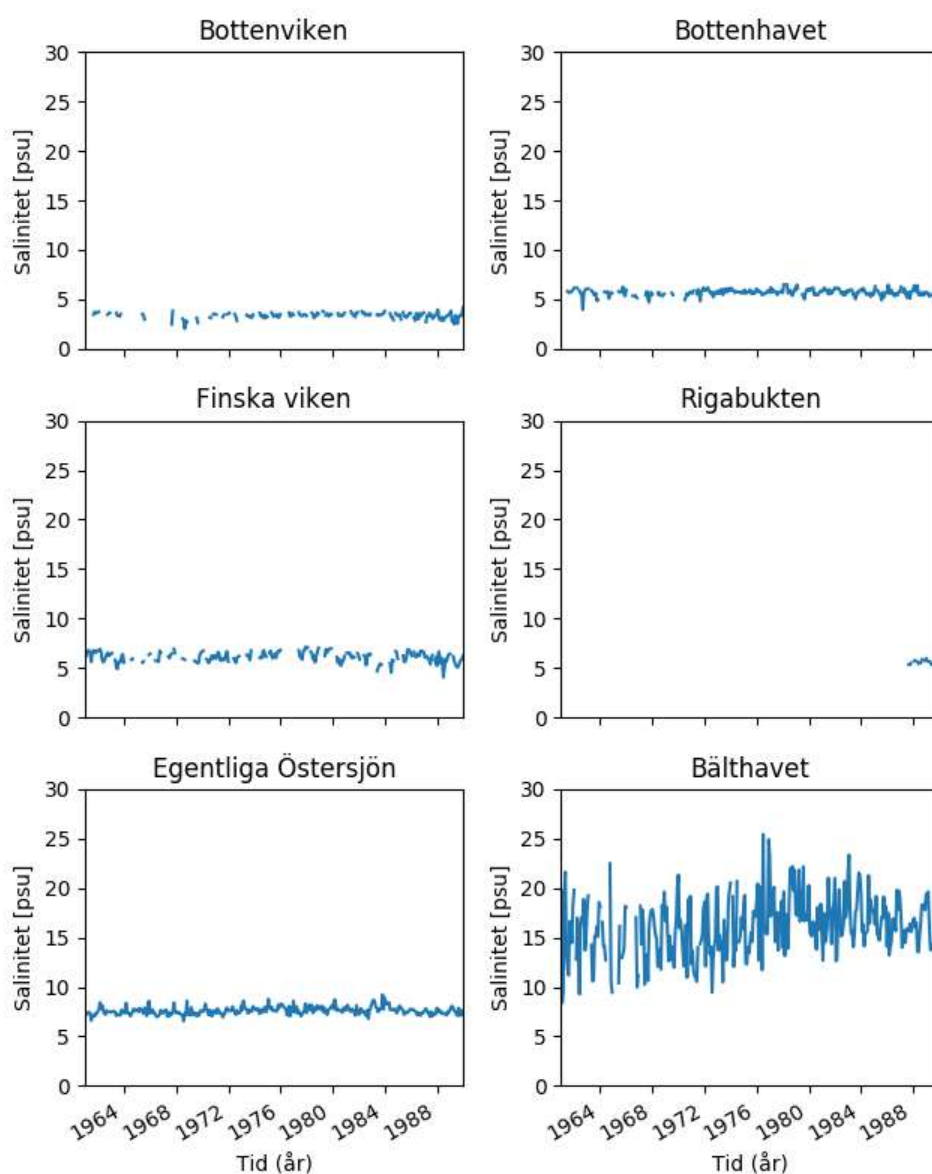
Varje bassäng antas ha en homogen salinitet, beräknad från medelvärdet per månad för samtliga mätningar i respektive bassäng.

2.2 Data

All data har sökts fram genom SLU-bibliotekets söktjänst, Primo, alternativt genom SMHI:s webbsida.

2.2.1 Salinitet

Saliniteten är baserad på en sammanställning av data tagna med olika instrument, såsom CTD, flaskprover, och bojar (Figur 2) (ICES 2019).



Figur 2. Salinitet i Östersjöns bassänger för perioden 1960–1990. Årsvariationer förekommer, men över tid är saliniteten jämn.

Data för saliniteten i Rigabukten saknas för åren 1961–1986. Saliniteten antas dock hållas relativt stabil över hela perioden 1961–1990, likt den gjort i Bottenviken och Finska viken, och medelvärde för 1987–1990 används därför för hela perioden (Figur 2).

2.2.2 Nederbörd och avdunstning

Värden för nederbörd och avdunstning över Östersjön utgår från medelvärden för 1951–1970. I studien av HELCOM (1986) beräknades nederbörden utifrån uppmätta data över nederbörd vid kuststationer, öar, samt skepp utrustade med mätverktyg. Även data över avdunstning är baserad på meteorologiska data från dessa mätstationer, och kompletterades med en noggrann undersökning 1975–1977 (HELCOM 1986).

Tabell 1. *Nederbörd, avdunstning, avrinning från land samt nettoflöde per ytenhet i samtliga bassänger, värden visas i $10^{-3} \text{ km}^3/\text{år km}^2$.*

Bassäng	Yta (km^2)	Nederbörd	Avdunstning	Avrinning	Nettoflöde
Bottenviken	36260	0,5074	0,3530	2,7027	2,8571
Bottenhavet	79257	0,5716	0,4366	1,1482	1,2832
Finska viken	29498	0,5933	0,4916	3,7969	3,8986
Rigabukten	17913	0,5917	0,4968	1,7864	1,8813
Egentliga Östersjön	209930	0,6283	0,5383	0,5430	0,6331
Bälthavet	20121	0,6958	0,4672	0,9383	1,1669

2.2.3 Avrinning

De värden som använts för avrinning från land till Östersjön utgår från medelvärden för hela perioden 1951–1990. Denna data består av mätningar från stationer främst vid flodmynningar, och har kompletterats med beräknade flöden baserade på närliggande mätstationer. Värdet för Bälthavet inkluderar också avrinningen till Kattegatt (Bergström & Carlsson 1993). Detta har delvis kompenserats för i denna studie genom att räkna bort utflödet från Göta Älv till Kattegatt ($18.12 \text{ km}^3/\text{år}$).

Störst nettoflöde per ytenhet har Finska viken, vars tillrinningsyta är 14 gånger större än vikens yta (Bergström & Carlsson 1993).

2.2.4 Bassänger

Östersjöns indelning i bassänger (Figur 1) samt arean för bassängerna är baserad på HELCOMs indelningar. Bassängerna är sammanlänkade men avgränsas för studiens skull i syfte att öka precisionen av modellen för olika delar av Östersjön. Dessa avgränsningar har gjorts vid naturliga trösklar i form av trånga passager mellan öar och landmassor eller grund (HELCOM 1986). Trösklarna mellan Egentliga Östersjön och Bottenhavet, samt mellan Egentliga Östersjön och Rigabukten är så grunda att det tyngre saltvattnet

under haloklinen blockeras från att tränga in i bassängerna. Alla dessa trösklar orsakar skillnader i bland annat salinitet och vattenfärg då omblandningen av vatten mellan dem är begränsad (Omstedt *et al.* 2014).

Bassängerna för Bottenviken och Bottenhavet separeras i studien av öarna i Norra Kvarken, mellan Umeå och Vasa. Åland räknas in i Bottenhavets bassäng, och fungerar som dess södra gränsdragning. Västra gränsen för Finska viken löper från Hangö udd i Finland till Estlands nordvästra udde, vid ön Osmussaar. Rigabukten avgränsas från övriga Östersjön genom öarna Saarenmaa och Hiiumaa. Egentliga Östersjön är den största bassängen som omfattar de centrala delarna av Östersjön och avgränsas mot Bälthavet av en linje från Falsterbo i Sverige till Stevns Klint i Danmark, och från danska Gedser Odde till tyska Darsser Ort. Gränsen mellan Bälthavets bassäng och Kattegatt har dragits från Kullens fyr i Skåne till Själlands norra udde, Gilleleje, samt från Griben till Ebeltoft udde (HELCOM 1986).

2.2.5 Klimatscenarier

Förändringar i vatten- och saltflöde baseras på modellberäkningar för nederbörd och temperatur i Sverige för perioden 1961–2099 (SMHI 2014). I dessa har 3 klimatmodeller använts för RCP2.6 samt 9 klimatmodeller för RCP4.5 och RCP8.5. För varje scenario används medelvärdet för alla klimatmodeller som körts, samt standardavvikelsen för att randomisera simuleringarna.

Då de beräknade förändringarna inte kommer vara lika stora i hela Sverige har data för specifika avrinningsområden valts ut som värden för varje bassäng i denna analys. Varje avrinningsområde omfattar ett eller fler vattendrag, och har valts ut som geografiskt representativt för samtliga avrinningsområden för en hel bassäng. Förändringen i Bottenviken är baserad på avrinningsområdet för Luleälven, Ålån och Rosån. Bottenhavet utgår ifrån avrinningsområdet för Gådeån och Indalsälven. Förändringen i Egentliga Östersjön, Finska viken samt Rigabukten antas vara samma som i avrinningsområdet för Motala ström då de ligger geografiskt nära varandra. Avrinningsområdet som används för Bälthavet är det för Nybroån, Sege å, Höje å, Kävlingeån, Saxån och Råån (södra Skåne). Se figur 3 för geografisk utbredning av dessa avrinningsområden. Avrinningen från land antas öka proportionerligt med nederbörden.

Avdunstningen beräknas globalt öka med 2 % per grad höjd temperatur (Held & Soden 2006).



Figur 3. Utvalda avrinningsområden representativa för klimatscenarier för Östersjöns bassänger. Modelldata för avrinningsområdena representerar bassängerna enligt följande: 1 (Luleälv, Älven och Rosån): Bottenhavet; 2 (Gådeån och Indalsälven): Bottenhavet; 3 (Motala ström): Egentliga Östersjön, Finska viken och Riga-bukten; 4 (Nybroån, Sege å, Höje å, Kävlingeån, Saxån och Råån): Bälthavet. Bassänger © HELCOM (2019); Specifika avrinningsområden © HELCOM (2017); Avrinningsområde: CCM River and Catchment Database © European Commission - JRC, 2007 (Vogt *et al.* 2007).

2.3 Modell

Modellen i denna studie är byggd i Insight Maker, en mjukvara för kontinuerlig och agentbaserad modellering. Insight Maker ansågs lämpligast för studiens syfte och begränsade tid, då programmet skulle kunna ge ett tillräckligt exakt resultat utan att bli för komplext och tidskrävande. Det har ett enkelt gränssnitt för att visuellt skapa enkla modeller, men ett integrerat programmeringsspråk möjliggör mer avancerade lösningar.

Alternativ mjukvara för modellen skulle kunna vara Microsoft Office Excel, men eftersom modellen omfattar 1668 månader (139 år) skulle det kunna bli mer svårhanterligt. Bristen på visuella flöden mellan bassängerna

skulle dessutom göra att modellen blir svårare att få en tydlig överblick över, vilket skulle kunna resultera i misstag i utformningen av den.

Modellen är en kontinuerlig dynamisk modell och är uppdelad i två sammankopplade system. Ett system hanterar vattenflödet, och ett annat hanterar saltflödet baserat på vattenflödet och vattnets salinitet.

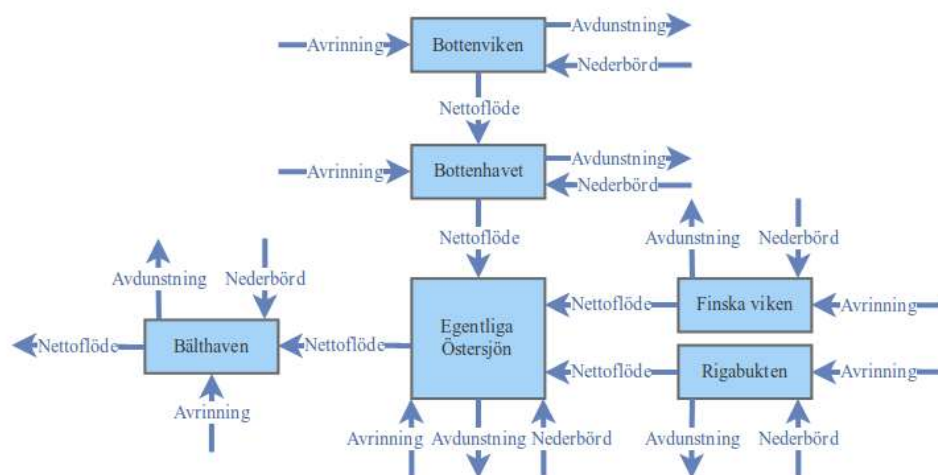
Modellen hanterar inte eventuell förhöjning av havsnivån, förändringar i havsströmmar eller eventuell ändring av vittringshastigheten.

2.3.1 Vatten

I vattensystemet (Figur 4) är varje bassäng representerad av en tillståndsvariabel med vattenmängd. Varje bassäng har ingående flöden av nederbörd och avrinning från vattendrag, samt utgående flöden för avdunstning. Bassängerna är sammankopplade geografiskt korrekt med nettoflöden mellan angränsande bassänger motsvarande den totala mängden tillfört minus avdunstat vatten, per bassäng. Då tillskottet av sötvatten är högre än avdunstningen är nettoflödet riktat mot Kattegatt. Allt tillfört sötvatten antas hålla vara helt fritt från salt. Nettoflödet från en bassäng till nästa beräknas enligt:

$$F_w = P + R + I - E \quad (1.)$$

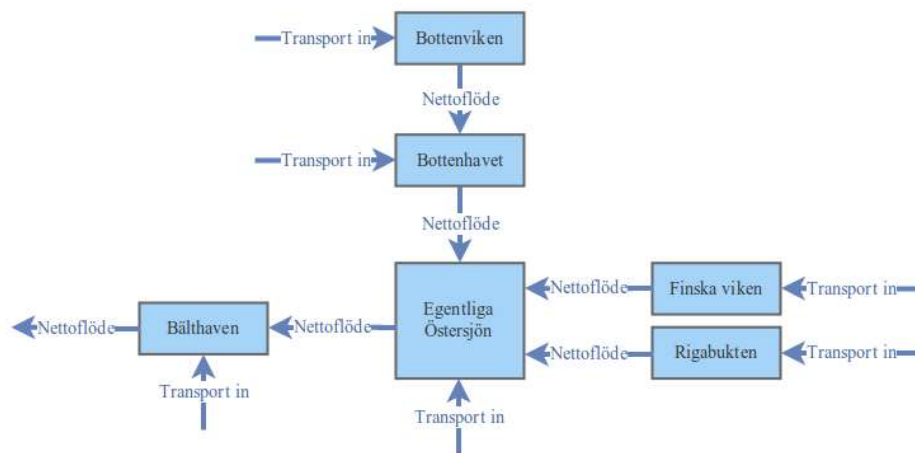
Där P är nederbörd, R avrinning från land, I inflöde från andra bassänger, och E avdunstning (evaporation). Eftersom E alltid är mindre än övrigt tillskott av vatten ($P + R + I$), blir F_w alltid ett positivt värde.



Figur 4. Förenklad modell av vattenflödet i Östersjön.

2.3.2 Salt

Saltsystemet (Figur 5) är uppbyggt på motsvarande sätt som systemet för vatten, men med saltmängd istället för vattenmängd. Salt flyttas tillsammans med strömmarna mellan bassängerna. Vertikal transport samt flöde av salt mot nettoströmriktningen representeras som ett inflöde till samtliga bassänger, här kallat "Transport in".



Figur 5. Förenklad modell av saltflödet i Östersjön. Flödet "Transport in" omfattar vertikal transport och saltflöden i riktning mot nettoflödet.

Tillfört vatten antas omedelbart blandas ut med vattnet i bassängerna, vilket medför att saliniteten sänks.

Den initiala saltmängden i respektive bassäng baseras på volymen för bassängen till ett djup på 10 meter, multiplicerat med bassängens genomsnittliga salinitet i psu beräknad ur data för perioden 1961–1990. Denna data kommer från mätningar tagna på ett djup på maximalt 10 meter, varför detta djup valts för att representera bassängerna (ICES 2019).

Mängden salt som flödar med nettovattenströmmar mellan bassängerna beräknas som det totala saltinnehållet för den mängd vatten som förflyttas baserat på dess salinitet enligt:

$$F_s = F_w \times S \quad (2.)$$

Där F_w är vattenflödet beräknat enligt (1), och S är saliniteten i bassängen vattnet flödar från.

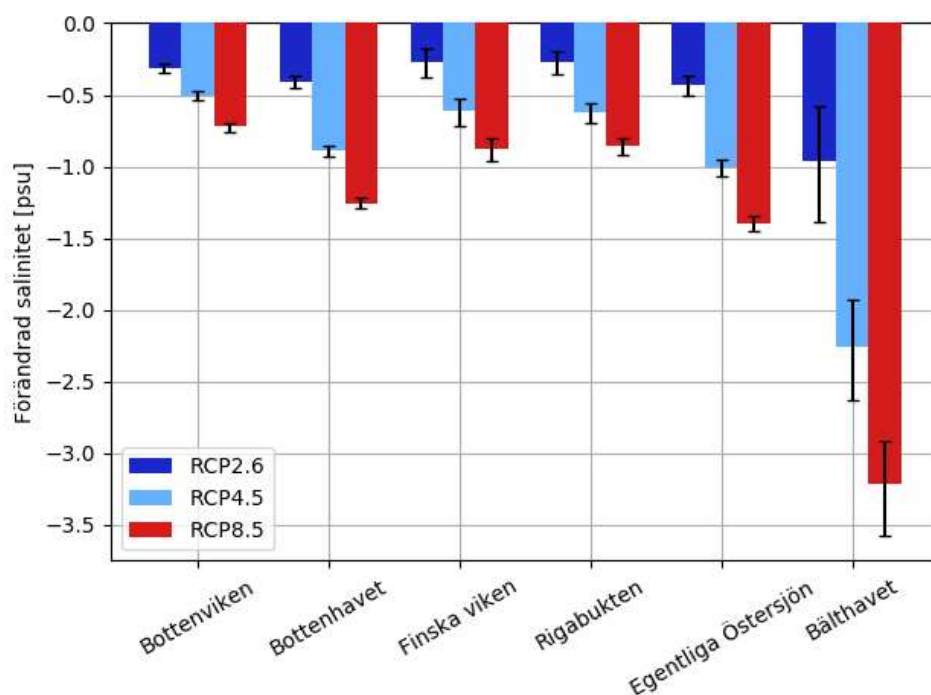
Saltflödet som tillförs bassängerna är en förenkling av vertikal transport och tillflöde mot nettoströmmen, och motsvaras av den totala mängd salt som behöver tillföras för att hålla salthalten på en stabil nivå med ett vattenflöde motsvarande det under perioden 1961–1990. Denna salttransport antas vara konstant då exakta värden saknas.

2.3.3 Simuleringar

Modellen kördes 50 gånger för respektive klimatscenario.

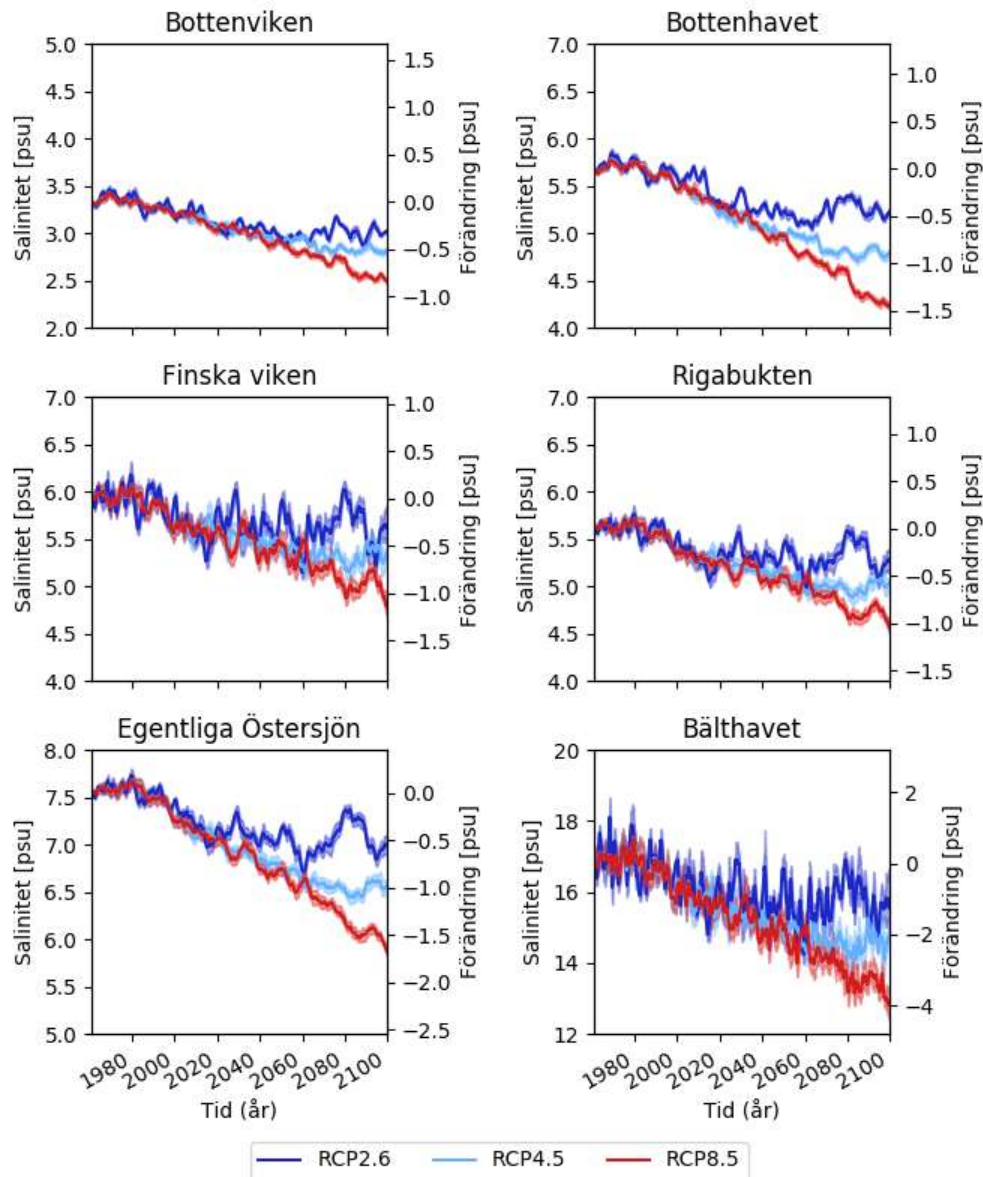
3 Resultat

Modellen indikerar att saliniteten kommer minska i samtliga bassänger i alla scenarier. Som framgår av figur 6 minskar saliniteten mer i klimatscenarion med högre strålningsdrivning. Den största minskningen sker i Bälthavet, men resultatet i bassängen är också det mest osäkra med ett vidare spann än övriga bassänger.



Figur 6. Förändrad salinitet i Östersjöns bassänger för perioden 2070–2099 jämfört med 1961–1990.

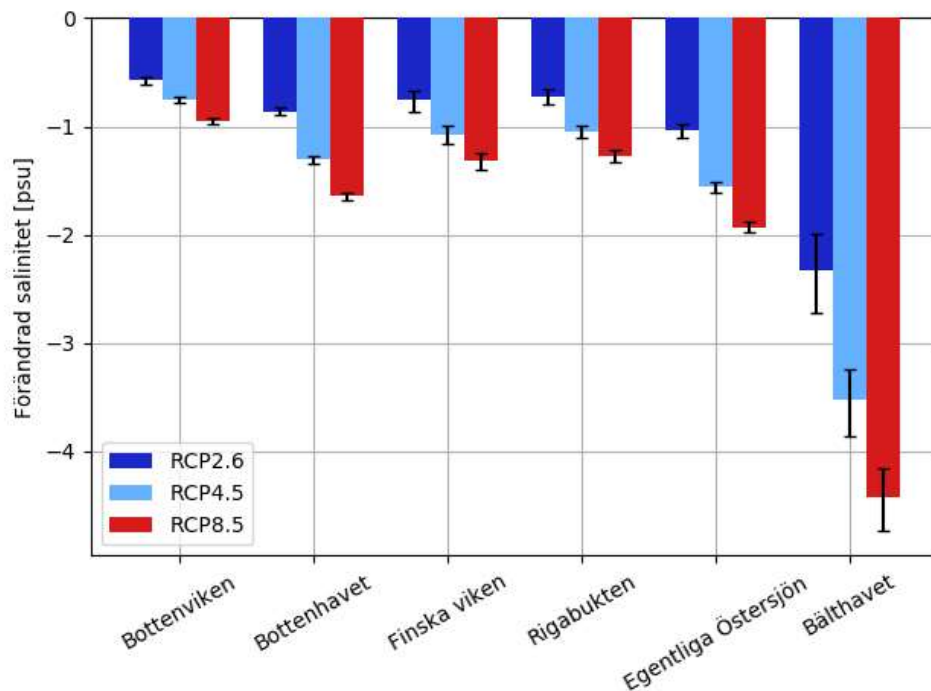
Saliniteten har en nedåtgående trend, men mellan åren 2073 och 2086 syns en tillfälligt ökad salinitet. Denna beror på en minskad nederbörd i den modelldata som använts (SMHI 2014), vilket leder till mindre tillfört sötvatten och därmed ett minskat utflöde från bassängerna.



Figur 7. Förändring av saliniteten i Östersjöns bassänger i utsläppsscenarierna RCP2.6, RCP4.5 samt RCP8.5 från år 1961 till 2099. Observera att skalan för Bälthavet skiljer sig från övriga bassänger.

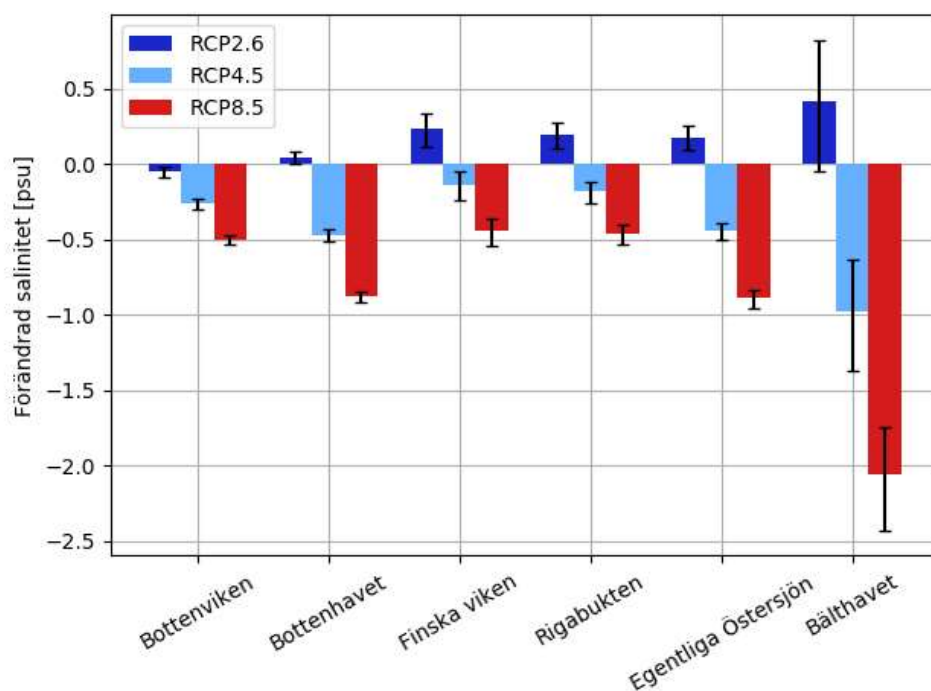
3.1 Känslighetsanalys

Tillförseln av salt från vertikal transport och tillflöden i riktning mot en bassängs nettoströmmar har samlats som ett statistiskt värde med syfte att stabilisera saliniteten för perioden 1961–1990, då faktiska mät- eller modelldata saknades. Detta är troligtvis inte realistiskt, utan dessa flöden kan mycket väl påverkas av framtida förändringar av klimatet. Med anledning av detta gjordes en känslighetsanalys för att utreda hur modellen påverkas av en förändring i salttillskott. Förändringen modellerades som en linjär minskning respektive ökning från originalvärdet år 1961 till 10 % år 2099.



Figur 8. Förändring av saliniteten i Östersjöns bassänger vid minskad tillförsel av salt från vertikal transport och tillflöden i riktning mot nettoströmmar.

Analysen visar som väntat en ytterligare sänkning av saliniteten vid ett minskat salttillskott i samtliga klimatscenarier. Störst blir skillnaden i RCP2.6, där minskningen av saliniteten fördubblas.



Figur 9. Förändring av saliniteten i Östersjöns bassänger vid ökad tillförsel av salt från vertikal transport och tillflöden i riktning mot nettoströmmar.

Ett förhöjt tillskott av salt leder inte till någon tydlig förändring vid RCP2.6 jämfört med dagens värden. För RCP4.5 finns en tendens till minskad salinitet i samtliga bassänger, dock mycket liten i Finska viken och Rigabukten. Simuleringen av RCP8.5 visar en något svagare sänkning av saliniteten än originalmodellen.

4 Diskussion

4.1 Validering

En sammanställning av resultaten från tre klimatmodeller för RCP2.6 samt fem för RCP4.5 och RCP8.5 tyder på en ytterligare sänkning av saliniteten än vad som påvisats av modellen i denna studie i samtliga scenarier och bassänger (SMHI 2017a; b). De värden som ligger närmast SMHI:s är de för Bottenhavet och Egentliga Östersjön vid RCP8.5. SMHI:s sammanställning stämmer bättre överens med simuleringen av ett minskande salttillskott som gjordes i känslighetsanalysen. Vid ett minskat tillskott av salt är resultaten vid RCP2.6 för Bottenviken och Bottenhavet jämförbara med SMHI:s värden, medan övriga bassänger får något för höga värden. Vid RCP4.5 får samtliga bassänger utom Bottenviken högre värden än det jämförande resultatet. Modellresultatet för minskat salttillskott vid RCP8.5 ger högre värden i Bottenhavet och Egentliga Östersjön, jämförbara värden i Finska viken och Rigabukten, något samt för låg salinitet i Bottenviken. Det verkar finnas en viss korrelation mellan avvikelserna i förändrad salinitet mellan denna studie och SMHI:s resultat, och avvikelserna mellan resultatet för det minskade salttillskottet och SMHI:s studie. Eftersom salttillskottet beror på saliniteten i djupare vatten och i intilliggande bassänger låter detta rimligt. Dock finns det inte utrymme i denna studie att undersöka korrelationen för att kunna bygga en mer precis modell. En mer exakt modell skulle kontinuerligt beräkna detta tillskott baserat på den relativa förändringen i salinitet i bassängerna istället för att använda ett statistiskt värde eller en linjär förändring.

RCP8.5 är mest lik A2-scenariot som använts av IPCC i tidigare rapporter (Nakicenovic *et al.* 2000; IPCC 2007), och RCP6.0 kan jämföras med B2-scenariot (IPCC 2014). I en studie gjord av SMHI (Meier *et al.* 2006) simulerades bland annat saliniteten i Östersjön enligt A2- och B2-scenarierna i

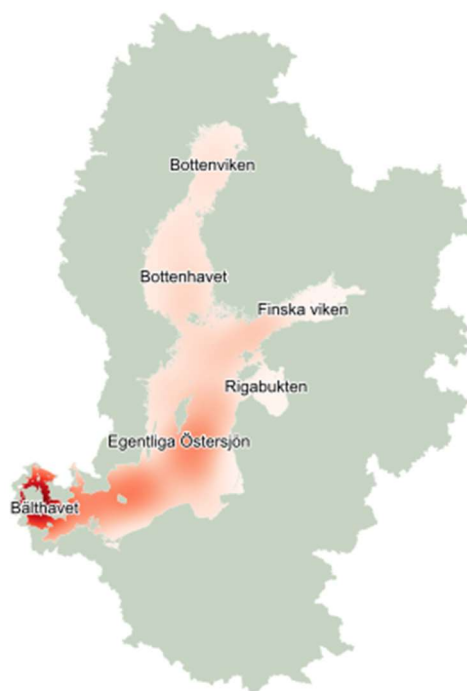
11 respektive 5 modeller. Studien gav ett osäkert resultat på grund av att vissa modeller kan tendera att ge oavsiktlig systematisk förskjutning, exempelvis ger vissa modeller temperaturuppskattningar som tenderar att vara lägre än andra modeller. Modellen som visade största förändringen i saliniteten använde A2-scenariot och tydde precis som simuleringen av scenariot RCP8.5 i denna studie på att största förändringen i saliniteten sker i Bälthavet. Exakta siffror finns inte att jämföra med, men förändringen i respektive bassäng är likvärdigt med SMHI:s sammanställning av RCP-scenarierna, förutom Egentliga Östersjön (SMHI 2017a; b). Där uppskattas förändringen vara större, vilket då också skulle kunna vara fallet med Bälthavet, varför resultatet i denna studie är mycket osäkert för Bälthavet.

4.2 Osäkerheter

Saliniteten i Rigabukten har antagits vara densamma för perioden 1961–1990 som uppmätta data för perioden 1987–1990. Detta kan ha lett till ett felaktigt resultat för saliniteten i bassängen då modellen kan ha utgått från ett felaktigt värde. För att utesluta denna osäkerhet hade data för åren 1961–1986 krävts, alternativ kunde en senare tidsperiod valts som startpunkt. Senare data är dock inte lika komplett för övriga bassänger, då mätningar gjorts mindre frekvent (HELCOM 1986).

Valet av tidsperiod har troligtvis också påverkat slutresultatet. Som framgår i figur 7 verkar saliniteten tillfälligt öka mellan åren 2073 och 2086 på grund av en nederbördsminskning. Detta motsvarar nära halva perioden som resultatet beräknats för.

Saliniteten utgår från data insamlad i hela Östersjön, men de medelvärden som beräknats kan ha en viss geografisk förskjutning från det faktiska medelvärdet då mätningarna inte är jämt fördelade varken geografiskt eller över tid. Figur 10 illustrerar den geografiska förskjutningen.



Figur 10. Mängd provdata för saliniteten i Östersjön år 1961 till 1990. Rödare områden har mer provdata för perioden. Bassänger © HELCOM (2019); Avrinningsområde: CCM River and Catchment Database © European Commission - JRC, 2007 (Vogt *et al.* 2007); Salinitetsprover © ICES (2019).

Den modelldata som använts för klimatscenarion är baserad på enstaka intilliggande avrinningsområden i Sverige för respektive bassäng. Någon motsvarande data saknades dock för övriga länder runt Östersjön, vilket ledde till förenklingen att använda samma data för Finska viken och Rigabukten som för Egentliga Östersjön. Dessa värden kanske inte är fullt representativa för dessa två bassänger. Exempelvis är avrinningen till Finska viken mycket hög sett till bassängens storlek, och avrinningsområdet omfattar en stor area som kan ha ett annat klimat än det i avrinningsområdet för Motala ström. Att alls förenkla denna data orsakar en viss osäkerhet, möjligtvis vore det mer exakt att beräkna ett medelvärde för samtliga avrinningsområden som angränsar till respektive bassäng. Detta har dock inte varit möjligt på grund av bristande datatillgänglighet för andra länder än Sverige.

Bälthavets geografi med många öar och trånga passager ger en väldig spridd salinitet. På Östersjösidan av sunden är saliniteten i nivå med egentliga Östersjön, medan norra delen mot Kattegatt har en betydligt högre sali-

nitet liknande den i Kattegatt. I sunden däremellan finns en stark salinitetsgradient, både i riktning ut från Östersjön, och ned i djupet. Detta gör det omöjligt att bestämma en genomsnittlig salinitet som är representativ för hela bassängen. För att möjliggöra modellering av förändringen av salinitet har detta dock gjorts, och det resulterande värdet för bassängen behöver korrigeras för att överensstämma med olika delar av Bälthavet.

Utelämnade faktorer påverkar också resultatets säkerhet. Höjd havsnivå skulle kunna påverka både strömmar mellan bassänger och mellan Östersjön och Kattegatt. Det skulle kunna ge en jämnare fördelning av saltet i Östersjön då vattnet och därmed saltet kan flöda mer obehindrat mellan bassänger då trösklarna kan förskjutas djupare ned i havet.

4.3 Alternativa modellkonstruktioner

Eftersom Östersjön saknar permanenta strömmar och de strömmar som finns är mycket variabla, saknades data som kunde användas för modellsimulering. Effekter av strömmar orsakade av vindar och andra faktorer har därför inte tagits med i modellen. Strömmar har istället modellerats som flöden baserade på vattentillskott. För detta har olika modellkonstruktioner prövats med varierande resultat. En första modell utformades för att hålla en konstant havsnivå i samtliga bassänger trots varierande vattentillskott. Detta utfördes genom att låta allt tillfört sötvatten blandas om med saltvattnet i bassängerna och sedan flöda direkt ut ur Östersjön på samma sätt som i den slutgiltiga modellen (1). Detta leder dock till att allt salt endast på några år transporteras ut ur Östersjön till Nordsjön. I den slutgiltiga modellen kompenserades denna effekt med en konstant tillförsel av salt innefattande vertikal transport och strömmar i båda riktningar mellan bassänger (kallat "Transport in" i figur 5).

I ett försök att undvika problemet att allt salt strömmade ut ur Östersjön byggdes en alternativ modell, vilken beräknade höjdskillnaden i havsnivån mellan bassängerna orsakad av skillnaden mellan respektive bassängs tillskott av sötvatten. Syftet var att denna havsnivåskillnad skulle avgöra strömriktningen mellan bassängerna för att få till en mer verklig omblandning av vatten mellan bassänger, och därmed även en mer dynamisk transport av salt. Att implementera detta i en modell visade sig dock svårt och ledde till felaktiga vattenflöden och havsnivåer. Vattenflödet beräknades i denna modell enligt:

$$F_w = \frac{h_0 a_1 a_2}{a_1 + a_2} \quad (3.)$$

Där h_0 är havsnivåskillnaden mellan två bassänger, och a_i är arean för respektive bassäng. F_w tillåts inte anta ett negativt värde, då ett omvänt flöde också finns beräknas.

Ytterligare en metod som prövades i denna studie för att räkna ut vattenflödet från en bassäng var att summera volymen av allt vatten över normal havsnivå i bassängen och alla intilliggande bassänger, och sedan fördela ut överskottet av vatten över dessa bassänger. Flödet beräknades då enligt:

$$F_w = \frac{\sum_{i=0}^n a_i h_i}{\sum_{i=0}^n a_i} \quad (4.)$$

Där a_i är arean för respektive bassäng, och h_i är havsnivån över det normala i respektive bassäng. F_w tillåts inte anta ett negativt värde, då ett omvänt flöde också finns beräknas.

4.4 Modelleringsverktyg

För att modellera systemet med större precision behövs ett annat tillvägagångssätt än en modell byggd i Insight Maker. Vatten- och saltflöden är mer komplexa än att de kan representeras av enskilda flöden mellan stora bassänger, utan behöver istället modelleras som ett tredimensionellt rutnät liknande vad som gjorts i andra studier (Meier & Kauker 2003; Meier *et al.* 2006). Sådana så kallade sammankopplade atmosfäriska-oceanografiska modeller inkluderar RCAO (Rossby Centre Atmospheric-Ocean model (SMHI 2017c)) och HadCM3 (Hadley Centre coupled model (Gordon *et al.* 2000)). Med en tredimensionell modell blir det inte nödvändigt att förenkla Östersjöns homogena bassänger med enkelriktade strömmar. Istället kan vatten transporteras mellan celler i rutnätet i alla riktningar och på så vis följa det naturliga flödet motsols enligt corioliseffekten. Det blir även möjligt att simulera vertikal transport av salt då saliniteten kan öka med djupet och salta strömmar från Kattegatt kan inkluderas i salttransporten (Meier *et al.* 1999). Även problematiken kring Bälthavets stora variation i salinitet över sunden kan lösas, då upplösningen kan vara tillräckligt hög för att saliniteten inom cellerna i praktiken blir mer homogen. Upplösningen i studier som gjorts för med regionala klimatmodeller varierar mellan 4 och 50 km breda rutor i rutnätet (Meier & Kauker 2003; Meier *et al.* 2006). Modeller som dessa är dock inte öppet tillgängliga på samma sätt som Insight Maker, och det skulle vara

allt för tidskrävande att få tillräckliga kunskaper om för att kunna modellera vad denna studie omfattar.

5 Slutsats

Studien tyder på en minskad salinitet i hela Östersjön i samtliga klimatscenario till slutet av århundradet, dock med en stor osäkerhet kring hur stor förändringen kan bli. Resultatet för Bälthavet är det osäkraste av alla bas-sänger, och är inte representativt för hela dess utbredning på grund av den starka salinitetsgradienten från Östersjön till Kattegatt.

Jämförelser med liknande studier tyder på starkare sänkning av saliniteten än vad som påvisats i denna studie. Modellen som byggts underskattar därför troligtvis minskningen av saliniteten i Östersjön, delvis på grund av för lågt uppskattad vertikal transport och omblandning av salt mellan bas-sänger.

Referenslista

- Bergström, S. & Carlsson, B. (1993). *Hydrology of the Baltic Basin: Inflow of fresh water from rivers and land for the period 1950–1990*. SMHI. Tillgänglig: <http://smhi.diva-portal.org/smash/get/diva2:947971/FULLTEXT01.pdf> [2019-04-03]
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C.A., Banks, H., Gregory, J.M., Johns, T.C., Mitchell, J.F.B. & Wood, R.A. (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, vol. 16 (2), ss. 147–168. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003820050010>
- HELCOM (1986). *Water balance of the Baltic Sea*. Helsinki, Finland: Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki Commission. Tillgänglig: <http://www.helcom.fi/Lists/Publications/BSEP16.pdf>
- HELCOM (2017). Baltic Sea catchment area . Tillgänglig: <http://meta-data.helcom.fi/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/9e132cda-8f69-4f7a-9c66-8b9859e61441> [2019-05-29]
- HELCOM (2019). PLC Subbasins . Tillgänglig: <http://meta-data.helcom.fi/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1456f8a5-72a2-4327-8894-31287086ebb5> [2019-05-26]
- Held, I.M. & Soden, B.J. (2006). Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. *Journal of Climate*, vol. 19 (21), ss. 5686–5699. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1>
- Helm, K.P., Bindoff, N.L. & Church, J.A. (2010). Changes in the global hydrological-cycle inferred from ocean salinity. *Geophysical Research Letters*, vol. 37 (18). DOI: <https://doi.org/10.1029/2010GL044222>
- ICES (2019). *Surface data*. Tillgänglig: <https://ices.dk/marine-data/dataset-collections/Pages/Ocean-surface-temperature.aspx> [2019-04-17]
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Core Writing Team, Pachauri, R. K., & Mayer, L., red.). Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

- Change*. (Core Writing Team, Pachauri, R. K., & Mayer, L., red.). Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Krauss, W. (2001). Baltic Sea Circulation. I: Steele, J.H. (red.) *Encyclopedia of Ocean Sciences (Second Edition)*. Oxford: Academic Press, ss. 288–296.
- Lindkvist, T. & Hammarklint, T. (2011). Strömmar i svenska hav. SMHI. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/publikationer/strommar-i-svenska-hav-1.17791> [2019-05-07]
- Meier, H.E.M. & Kauker, F. (2003). Sensitivity of the Baltic Sea salinity to the freshwater supply. *Climate Research*, vol. 24 (3), ss. 231–242. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr024231>
- Meier, H.E.M., Kjellström, E. & Graham, L.P. (2006). Estimating uncertainties of projected Baltic Sea salinity in the late 21st century. *Geophysical Research Letters*, vol. 33 (15). DOI: <https://doi.org/10.1029/2006GL026488>
- Meier, M., Doescher, R., Coward, A.C., Nycander, J. & Döös, K. (1999). *RCO – Rossby Centre regional Ocean climate model: model description (version 1.0) and first results from the hindcast period 1992/93*. SMHI. Tillgänglig: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:smhi:diva-2664> [2019-05-29]
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. & Wilbanks, T.J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, vol. 463 (7282), ss. 747–756. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Grubler, A., Riahi, K., Roehrl, R.A., Rogner, H.-H. & Victor, N. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios (SRES), A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. Tillgänglig: <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/6101/> [2019-05-29]
- Omstedt, A., Elken, J., Lehmann, A., Leppäranta, M., Meier, H.E.M., Myrberg, K. & Rutgersson, A. (2014). Progress in physical oceanography of the Baltic Sea during the 2003–2014 period. *Progress in Oceanography*, vol. 128, ss. 139–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.08.010>
- Reissmann, J.H., Burchard, H., Feistel, R., Hagen, E., Lass, H.U., Mohrholz, V., Nausch, G., Umlauf, L. & Wicczorek, G. (2009). Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication – A review. *Progress in Oceanography*, vol. 82 (1), ss. 47–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.10.004>
- Sanderson, B.M., O'Neill, B.C. & Tebaldi, C. (2016). What would it take to achieve the Paris temperature targets? *Geophysical Research Letters*, vol. 43 (13), ss. 7133–7142. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016GL069563>
- SMHI (2014). *Ladda ner scenariodata*. Tillgänglig: <http://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/ladda-ner-scenariodata> [2019-05-13]
- SMHI (2017a). *Klimatscenarier för hav*. Tillgänglig: <http://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/klimatscenarier-for-hav> [2019-05-13]
- SMHI (2017b-06-29). *Om Klimatscenarier för hav*. Tillgänglig: <http://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/om-klimatscenarier-for-hav-1.123229> [2019-05-17]

- SMHI (2017c). *RCAO*. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/forskning/forskningsomraden/klimat-forskning/rcao-1.406> [2019-05-29]
- Vogt, J., Soille, P., De Jager, A., Rimaviciute, E., Mehl, W., Foisneau, S., Bodis, K., Dusart, J., Paracchini, M.L. & Haastrop, P. (2007). A pan-European river and catchment database. *European Commission, EUR*, vol. 22920, s. 120
- Vuorinen, I., Hänninen, J., Rajasilta, M., Laine, P., Eklund, J., Montesino-Pouzols, F., Corona, F., Junker, K., Meier, H.E.M. & Dippner, J.W. (2015). Scenario simulations of future salinity and ecological consequences in the Baltic Sea and adjacent North Sea areas—implications for environmental monitoring. *Ecological Indicators*, vol. 50, ss. 196–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.019>
- Winsor, P., Rodhe, J. & Omstedt, A. (2001). Baltic Sea Ocean Climate: An Analysis of 100 Yr of Hydrographic Data with Focus on the Freshwater Budget. *Climate Research - CLIMATE RES*, vol. 18, ss. 5–15

Tack

Tack till min handledare, Hans Liljenström, som hjälpt mig ta fram en fungerande modell med lämpliga avgränsningar.

Bilaga 1 - Resultat

Tabell 2. *Minskad salinitet i Östersjöns bassänger för perioden 2070–2099 jämfört med 1961–1990.*

Bassäng	RCP2.6 (psu)	RCP4.5 (psu)	RCP8.5 (psu)
Bottenviken	0.28 - 0.34	0.47 - 0.54	0.69 - 0.75
Bottenhavet	0.36 - 0.44	0.85 - 0.92	1.21 - 1.29
Finska viken	0.15 - 0.36	0.51 - 0.7	0.79 - 0.95
Rigabukten	0.18 - 0.34	0.55 - 0.69	0.8 - 0.91
Egentliga Östersjön	0.36 - 0.5	0.94 - 1.06	1.34 - 1.45
Bälthavet	0.53 - 1.34	1.89 - 2.59	2.87 - 3.52

Bilaga 2 - Känslighetsanalys

Tabell 3. *Sänkning av saliniteten i Östersjöns bassänger vid minskad tillförsel av salt från vertikal transport och tillflöden i riktning mot nettoströmmar.*

Bassäng	RCP2.6 (psu)	RCP4.5 (psu)	RCP8.5 (psu)
Bottenviken	0.54 - 0.6	0.72 - 0.78	0.92 - 0.98
Bottenhavet	0.82 - 0.9	1.26 - 1.34	1.6 - 1.67
Finska viken	0.65 - 0.84	0.99 - 1.15	1.24 - 1.4
Rigabukten	0.64 - 0.78	0.98 - 1.1	1.21 - 1.32
Egentliga Östersjön	0.97 - 1.09	1.5 - 1.61	1.88 - 1.97
Bälthavet	1.94 - 2.67	3.19 - 3.82	4.11 - 4.68

Tabell 4. *Sänkning av saliniteten i Östersjöns bassänger vid ökad tillförsel av salt från vertikal transport och tillflöden i riktning mot nettoströmmar. Observera att negativa värden innebär högre salinitet.*

Bassäng	RCP2.6 (psu)	RCP4.5 (psu)	RCP8.5 (psu)
Bottenviken	0.01 - 0.09	0.22 - 0.29	0.46 - 0.53
Bottenhavet	-0.1 - -0.01	0.43 - 0.51	0.84 - 0.91
Finska viken	-0.35 - -0.13	0.04 - 0.23	0.34 - 0.53
Rigabukten	-0.28 - -0.11	0.11 - 0.25	0.39 - 0.52
Egentliga Östersjön	-0.25 - -0.09	0.38 - 0.5	0.82 - 0.94
Bälthavet	-0.88 - -0.01	0.58 - 1.32	1.69 - 2.37

Sveriges Lantbruksuniversitet
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
www.slu.se/institutioner/energi-teknik

Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Energy and Technology
P. O. Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
www.slu.se/en/departments/energy-technology/